Die energieoptimale Auslegung elektrischer Antriebssysteme

Benutzerhandbuch

SEMAFOR Informatik & Energie AG

Version 2.0

Copyright ©1995-98 by SEMAFOR Informatik & Energie AG

Die in diesen Unterlagen enthaltenen Informationen sind Teil einer urheberrechtlich geschützten Software und können ohne vorherige Ankündigung geändert werden. SEMAFOR übernimmt keine Haftung für eventuell darin enthaltene Fehler.

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche schriftliche Erlaubnis der SEMAFOR AG darf kein Teil dieser Unterlagen für irgendwelche Zwecke vervielfältigt oder übertragen werden.

OPAL ist eingetragenes Warenzeichen der SEMAFOR Informatik & Energie AG. Die verwendeten Produktbezeichnungen sind in den meisten Fällen eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Hersteller und unterliegen den gesetzlichen Bestimmungen.

Das Dokument wurde mit Hilfe von LaTeX erstellt.

Vorwort

Asynchronmotoren beanspruchen einen bedeutenden Anteil des elektrischen Energieverbrauches. Verschiedene Studien haben nun gezeigt, dass viele Motoren, gemessen an den Anforderungen ihres Arbeitsprozesses, überdimensioniert sind und deshalb mit zu geringem Wirkungsgrad und Leistungsfaktor betrieben werden.

Energieeinsparungen bei der Auslegung elektrischer Antriebssysteme sind jedoch aufgrund der heutigen Energiepreise nur dann zu erzielen, wenn den Projektierenden einfach anwendbare Hilfsmittel angeboten werden, die sie bei der Dimensionierung der Anlagen und der Auswahl geeigneter Motoren unterstützen [7].

Genau dies war der Anlass zur Entwicklung von OPAL. In Zusammenarbeit mit Hochschulen (Eidgenössische Technische Hochschulen Zürich und Lausanne, Fachhochschule beider Basel) und namhaften Schweizer Firmen hat SEMAFOR ein Softwarepaket erstellt, in dem nicht nur die neuesten Erkenntnisse zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Effizienzsteigerung bei Antrieben mit Normmotoren sondern auch wirtschaftliche Kriterien berücksichtigt sind.

Leichte Bedienbarkeit, hohe Zuverlässigkeit, Funktionalität und Leistungsfähigkeit sind wesentliche Ziele von OPAL. Um diese Ziele zu erreichen, wurde das Programm wie auch die vorliegende Dokumentation mit grosser Sorgfalt erstellt und überprüft. Trotzdem können Fehler und möglicherweise gewisse Unzulänglichkeiten nicht ganz ausgeschlossen werden. Wir sind deshalb auf Ihre Verbesserungsvorschläge und Kritik angewiesen. Senden Sie diese per E-Mail, Fax oder Brief an untenstehende Adresse. Aber auch Fragen oder Bemerkungen sind uns willkommen. Wir werden uns bemühen, sie so rasch als möglich zu beantworten.

Und noch eine Bitte: Lesen Sie dieses Handbuch und die Lizenzbestimmungen sorgfältig durch, bevor Sie mit dem Programm zu arbeiten beginnen. Sie können uns und sich selbst viel unnötige Arbeit und Ärger ersparen.

Das Handbuch ist wie folgt gegliedert:

Kapitel 1 beschreibt in einer Übersicht den Programmablauf und die Eigenschaften und Einschränkungen von OPAL.

In Kapitel 2 wird nach einer kurzen Einführung detailliert auf die Motorauswahl selbst eingegangen.

Kapitel 3 behandelt die Aspekte der Datenverwaltung wie Erfassen und Modifizieren von Motor- und Herstellerdaten.

Das implementierte Datenmodell und die Berechnungsmodelle finden sie in Anhang A und B beschrieben.

Die Autoren danken allen am Projekt beteiligten Firmen und namentlich den Herren

- F. Spycher von ABB Normelec AG, Zürich
- M. Thalmann von Fuji Electric AG, Steinach
- Prof. A.Rufer und Dr. F. Moghaddam Butzberger vom Institut für Leistungselektronik, ETH Lausanne
- Dr. R. Neubauer vom Institut für Elektrische Maschinen, ETH-Zürich
- Dr. R.Gutzwiller und B. Hanselmann von der Fachhochschule beider Basel
- R. Brüniger von R. Brüniger AG, Ottenbach

für ihren Einsatz und ihre konstruktive Mitarbeit. Ebenso gilt unser Dank den Herren Michael Fuchs und Gregor Leonhardt, die einige „Unschönheiten“ an der Prototypversion aufdecken konnten.

Wir danken ganz besonders auch dem Schweizerischen Bundesamt für Energie (BFE) für ihre finanzielle Unterstützung.

Basel, August 1998

Günther Amsler
Hansjörg Riesen
Dr. Ronald Tanner

SEMAFOR Informatik & Energie AG
Sperrstrasse 104 B
CH-4057 Basel

Fax: +41 61 690 9880
E-Mail: `support.opal@semafor.ch`

Inhaltsverzeichnis

1 Übersicht **1**

1.1 Eigenschaften . . . 2
1.2 Struktur . . . 2
1.3 Ablauf . . . 2
1.4 Einschränkungen . . . 4
1.5 Systemanforderungen . . . 4

2 Motorauswahl **5**

2.1 Grundsätzliches zur Auslegung elektrischer Antriebe . . . 5
2.2 Vorgehen . . . 8
2.3 Öffnen der Motorendatenbank . . . 9
2.4 Eingabe der Projektdaten . . . 10
2.4.1 Netzantriebe . . . 10
2.4.2 Umrichterantriebe . . . 13
2.5 Berechnungen durchführen . . . 14
2.6 Grafische Analyse . . . 15
2.7 Berechnen der Wirtschaftlichkeit . . . 15
2.8 Erstellen des Berechnungsprotokolls . . . 16

3 Datenverwaltung **19**

3.1 Firmendaten erfassen und ändern . . . 19
3.2 Motoren erfassen . . . 20
3.3 Motoren suchen . . . 20
3.4 Motordaten ändern und löschen . . . 20

A Datenmodell **21**

A.1 Motor . . . 21
A.1.1 Katalogdaten . . . 22
A.1.2 Konstruktionsdaten . . . 22
A.1.3 Leerlaufdaten . . . 22
A.1.4 Anlaufdaten . . . 22
A.1.5 Wärmemodelldaten . . . 23
A.1.6 Elektrische Parameter . . . 23
A.1.7 Firmendaten . . . 23
A.2 Projektdaten bei Netzantrieb . . . 23
A.3 Projektdaten bei Umrichterantrieb . . . 24
A.4 Berechnungsergebnisse . . . 24

B Berechnungsablauf **24**

B.1 Vorauswahl bei Netzantrieb 24

B.2 Vorauswahl bei Umrichterantrieb 25

B.3 Elektrisches Modell 25

B.3.1 Berechnung der Ströme bei Umrichterantrieb 27

B.3.2 Verlustleistungen 27

B.4 Bestimmung der Parameter aus den Katalogdaten 27

B.5 Mechanisches Modell 27

B.6 Wärmemodelle 28

B.7 Wirtschaftlichkeitsberechnung 30

1 Übersicht

Bei der Auslegung elektrischer Antriebssysteme müssen unterschiedliche, sich oft gegenseitig beeinflussende, Anforderungen an Betriebskosten, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit berücksichtigt werden.

Hinzu kommt, dass der Motor als zentrale Komponente eines solchen Systems selbst vielfältigen Einflüssen ausgesetzt ist:

- Umgebung: Kühltemperatur, Aufstellhöhe, Feuchtigkeit
- Speisung: Spannungs-Frequenz-Kennlinie, Oberschwingungen
- Last: Lastspiel, Trägheitsmoment, Moment-Drehzahl-Charakteristik

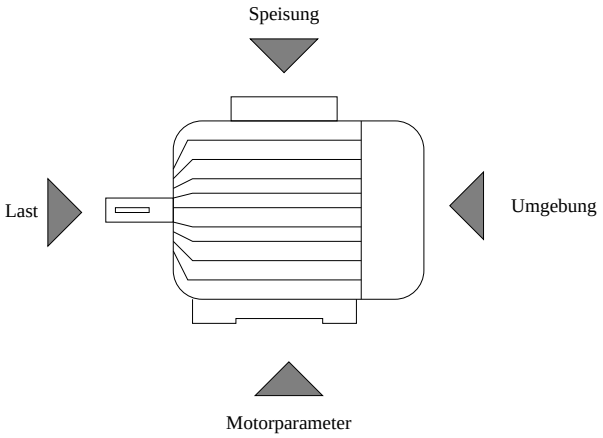


Abbildung 1: Einflussfaktoren in einem Antriebssystem

Ohne geeignete Werkzeuge ist die Konfiguration eines Antriebssystems offensichtlich mit erheblichem Aufwand verbunden. In der Praxis zeigt sich deshalb immer wieder, dass Optimierungsverfahren kaum je angewandt werden. Dabei könnten allein schon ökonomische Überlegungen Gründe genug dafür liefern, sind doch zum Beispiel die Betriebskosten massgeblich durch den Energieverbrauch bestimmt.

Entsprechende Einsparungen sind hauptsächlich durch folgende Massnahmen zu erzielen:

1. Bessere Wirkungsgrade der Komponenten
2. Bessere Anpassung an die Anforderungen des Prozesses
3. Bessere Betriebsführung durch Steuerung und Regelung

Mit OPAL können elektrische Antriebssysteme energieoptimal und herstellerübergreifend gemäss den Punkten 1 und 2 ausgelegt werden, durch

- die Auswahl geeigneter Motoren verschiedenster Hersteller aus einer Datenbank,
- die Simulation des Antriebssystems mit den ausgewählten Motoren und die Bestimmung des mechanischen, elektrischen und thermischen Verhaltens,
- die Bewertung und Darstellung der Simulationsergebnisse .

Hersteller	Katalog	Anzahl Motoren
ABB Normelec	BA/M2BA DE 94-11	152
AEG	M2d. 1994	92
BROOK Hansen		42
Carpanelli	Ed. 93	59
Emod	821/90	176
ELIN	MA 01/13-TB 6.93	154
FIMET	9107/E EDIT 12/94	138
Flender ATB-Loher	Liste AN 18	223
GEC-Alsthom	1.217-CEB-6/90	113
Koncar	KT 20.02: 1992	50
Landert Motoren	M-275/1 6.91	90
Leroy-Somer	1153-E32/b-9.92	88
Siemens	M11 1994/95	134
VEM	K11R/K10R 07/91	66
WEG		267

Tabelle 1: Inhalt der Motorendatenbank

1.1 Eigenschaften

OPAL ist ein effizientes Werkzeug für Antriebstechniker und -technikerinnen, die bereits über Kenntnisse und Erfahrung in der Projektierung von elektrischen Antrieben verfügen. Die hierzu notwendigen Grundlagen werden in diesem Handbuch nicht vermittelt. Der interessierte Leser, die interessierte Leserin, sei in diesem Zusammenhang auf die RAVEL-Kurse [5] und die entsprechende Literatur verwiesen.

Der Anwender, die Anwenderin ist mit OPAL in der Lage, für ein bestimmtes Antriebsproblem schnell eine Liste geeigneter Motoren zu erhalten und die Motoren hinsichtlich verschiedener Kennzahlen (Verluste, Anlaufzeit, Anlaufstrom etc.) einfach miteinander zu vergleichen.

Keinesfalls jedoch will OPAL die Motorenkataloge der Hersteller ersetzen, sondern sie vielmehr ergänzen. In den Herstellerkatalogen sind sehr oft zusätzliche Angaben und wichtige Hinweise zu den Motoren enthalten.

1.2 Struktur

OPAL besteht aus einem Berechnungsmodul und einer Datenbank mit den Katalogdaten von derzeit 1820 Motoren der wichtigsten europäischen Hersteller (Tabelle 1).

1.3 Ablauf

OPAL wählt anhand vorgegebener, projektspezifischer Anforderungen die am besten geeigneten Motoren aus und stellt sie nach Verlusten geordnet in einer Liste dar. (Siehe Abbildung 2)

Dazu berechnet das Programm nach einer groben Vorauswahl das elektrische, mechanische und thermische Verhalten eines jeden Motors. Die Ergebnisse können anschliessend grafisch analysiert und ausgewertet werden. Darüberhinaus können auch Kosten- und Amortisationsvergleiche durchgeführt werden.

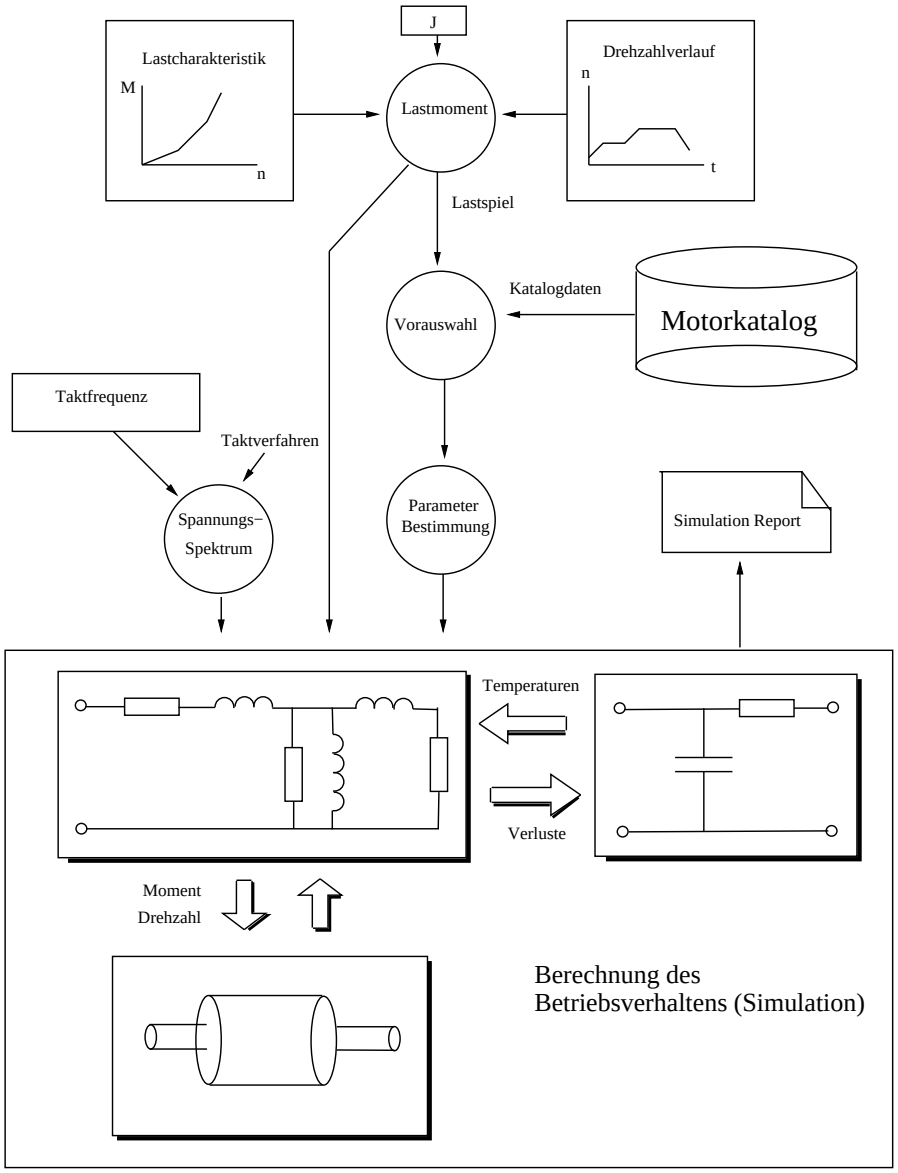


Abbildung 2: Berechnungsablauf

Die Berechnungsgenauigkeit hängt dabei wesentlich von den verfügbaren Motorendaten ab. OPAL unterscheidet deshalb die folgenden Genauigkeitskategorien:

	Datengruppen				
Kategorie	Katalog	Leerlauf	Wärmemodell	Anlauf	El. Modell
A	x	x	x	o	x
B	x	x	x	o	-
C	x	x	-	x	-
D	x	-	x	o	-
E	x	x	-	-	-
F	x	-	-	x	-
G	x	-	-	-	-

x Daten sind verfügbar
- nicht verfügbar
o optional

Liegen beispielsweise für einen Motor nur die Katalogdaten vor, ist vor allem bei den berechneten Temperaturwerten aber auch den Verlusten mit gewissen Abweichungen zu rechnen.

Um höchsten Ansprüchen zu genügen, müssen nebst den Katalogdaten auch die Parameter des elektrischen und thermischen Modells bekannt sein. SEMAFOR wird die Datenbank laufend nachführen und erweitern und sich bei den Herstellern dafür einsetzen, dass diese mehr und genauere Daten über ihre Motoren bekanntgeben.

1.4 Einschränkungen

Im wesentlichen liegen der Simulation die folgenden vereinfachenden Annahmen zugrunde

- Motor und Arbeitsmaschine sind starr gekuppelt,
- Sättigungseffekte der Eisenverluste und des Magnetisierungsstromes sind vernachlässigbar,
- die Spannung bei Netzbetrieb ist sinusförmig, symmetrisch und konstant,
- bei Umrichterbetrieb folgt die Spannung im Anlaufbereich proportional der Frequenz und bleibt im Feldschwächbereich konstant, die Spannungsbildung basiert auf dem PWM-Verfahren mit konstanter Taktfrequenz [8].

1.5 Systemanforderungen

OPAL läuft auf IBM-kompatiblen Rechnern mit einem Pentium Prozessor, 16MB RAM (empfohlen 32MB) und mindestens 5 MB Festplattenkapazität unter Windows NT und Windows 95. Für die Anzeige der Online-Hilfe wird zusätzlich ein geeigneter HTML-Browser (nicht im Lieferumfang enthalten) benötigt.

2 Motorauswahl

2.1 Grundsätzliches zur Auslegung elektrischer Antriebe

Ein elektrisches Antriebssystem umfasst im allgemeinen [5]

- den Motor zur Wandlung der elektrischen Energie in mechanische (und umgekehrt),
- die mechanische Übertragung zwischen Motor und Arbeitsmaschine (Kupplung, Getriebe, Riemen . . .) zur Anpassung von Moment und Drehzahl,
- die Arbeitsmaschine zur Umsetzung der mechanischen Arbeit in einem Prozess (Bewegung, Transport, Verformung . . .),
- das Stell- und Steuerglied zwischen speisendem Netz und Motor (Schalter, Umrichter, Anlasser . . .).

Dazu kommen oft noch Komponenten zu Regelungs-, Schutz- und Steuerungszwecken, die hier aber nicht weiter betrachtet werden. Vom Motor wird in der Regel gefordert, dass

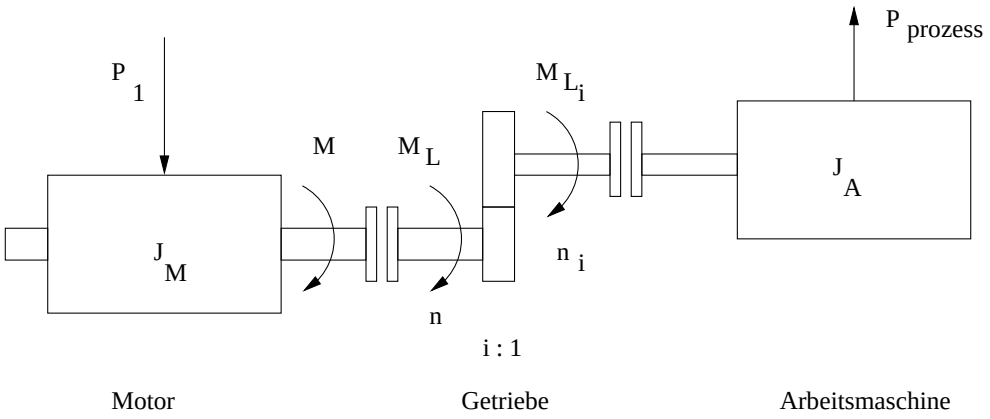


Abbildung 3: Antriebssystem

1. der Anlauf vom Stillstand bis zur Nenndrehzahl innerhalb einer bestimmten Zeit erfolgt,
2. das benötigte Drehmoment bei vorgegebener Drehzahl stets geliefert werden kann, das heisst die Erwärmung des Motors im zulässigen Bereich bleibt.

Abbildung 4 zeigt für einen 30kW-Motor den Verlauf des Wirkungsgrades in Funktion der Wellenleistung. Man erkennt deutlich, dass etwa unterhalb eines Drittels der Nennleistung der Wirkungsgrad stark abnimmt. Der Energieverbrauch dieses Motors ist in diesem Leistungsbereich zu gross, man wählt in diesem Fall besser einen Motor mit kleinerer Nennleistung.

Die Bewegungsgleichung bei starr gekoppelten Massen mit dem Getriebewirkungsgrad η_G und dem Übersetzungverhältnis i lautet:

$$2\pi(J_M + J_A/i^2)\frac{dn}{dt} = M + \eta_G \cdot M_{Li}/i \tag{1}$$

Bei gleichförmiger Bewegung (Beschleunigung ist null) muss gelten:

$$M = -M_L = -\eta_G \cdot M_{Li}/i \tag{2}$$

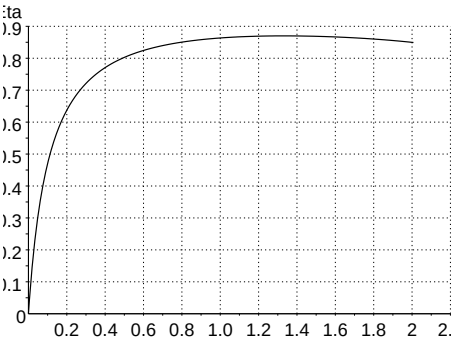


Abbildung 4: Wirkungsgrad in Funktion der Wellenleistung bei einem 30kW-Motor

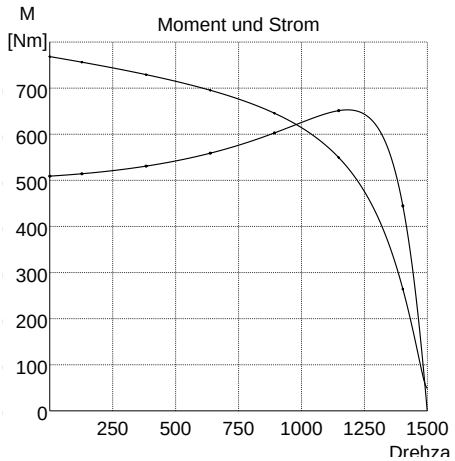
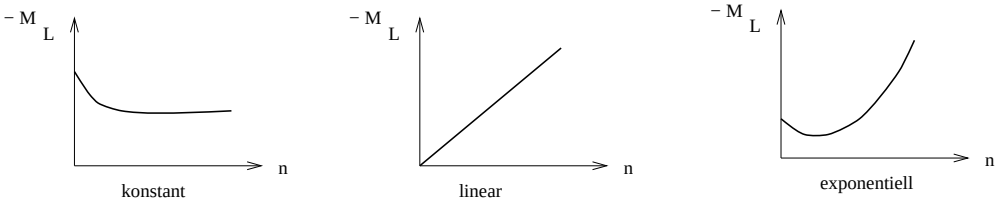


Abbildung 5: Drehmoment und Strom eines 4-poligen, 30kW-Motors

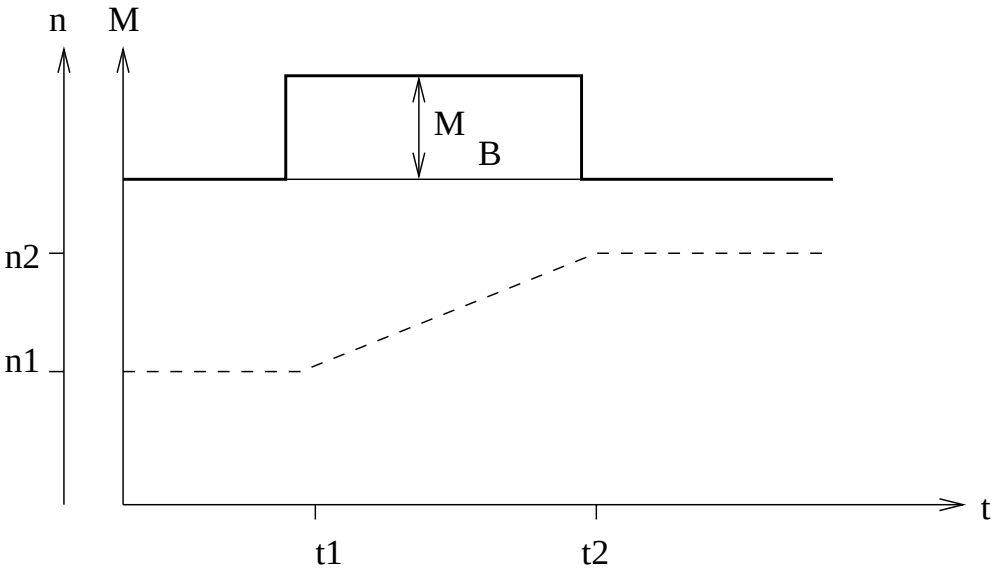
In der Regel sind sowohl Motor- wie auch Lastmoment drehzahlabhängig. Sie können grafisch in Form von Kennlinien dargestellt werden. Der jeweilige Arbeitspunkt ergibt sich dann aus dem Schnittpunkt der Motorkennlinie (Abbildung 5) mit einer der folgenden Lastkennlinien.

Beispiele für einige Lastkennlinien:

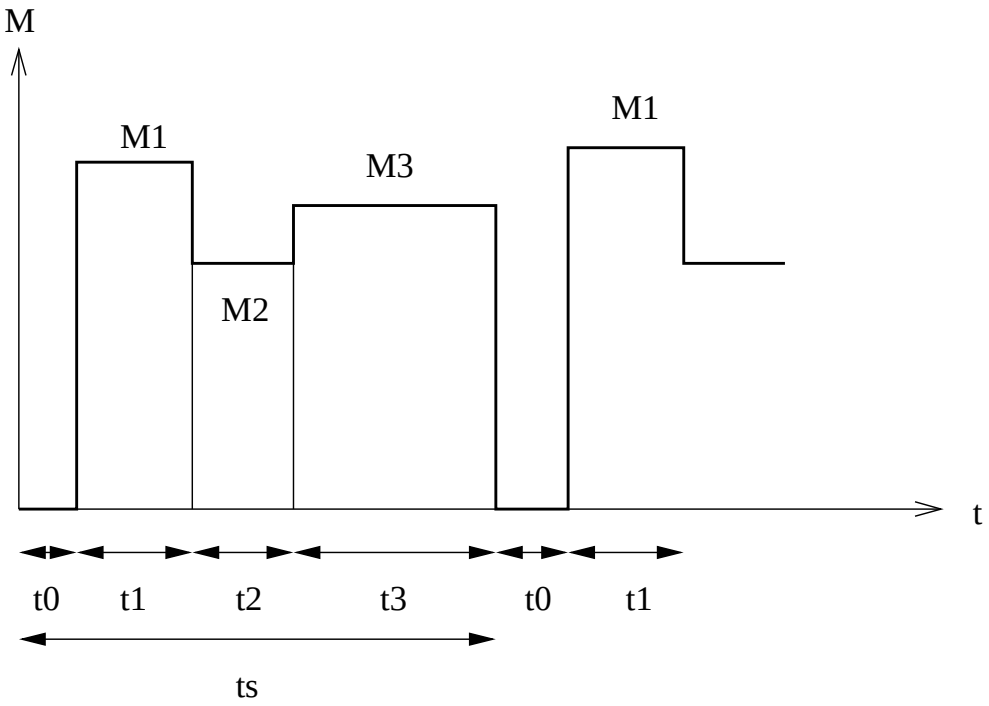


Auch im Beharrungszustand ist die Belastungsdauer von grosser Bedeutung. Belastungen können schwanken und oft sind auch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge zu berücksichtigen.

Beispiel für einen Beschleunigungsvorgang bei drehzahlunabhängigem Lastmoment:



So kann sich ein Lastspiel mit der Spieldauer ts ergeben, wie es die folgende Abbildung zeigt:



Beispiele für den Leistungsbedarf einiger Arbeitsprozesse :

- Drehmaschine :

$$P_W = \frac{1}{\eta} \cdot b \cdot p_s \cdot v \tag{3}$$

η :	Wirkungsgrad der Zerspanung
b :	Spanbreite
p_s :	Schnittdruck
v :	Schnittgeschwindigkeit

Bsp: $b = 12mm$, $v = 50mm/min$, $p_s = 1000N/mm^2$, $\eta = 0.8$

$$P_W = 1/0.8 \cdot 12 \cdot 1000 \cdot 50N/min = 12.5kW$$

- Bohrmaschine

$$P_W = \frac{\pi}{4\eta} \cdot D^2 \cdot p_s \cdot n \cdot s_v \tag{4}$$

η :	Wirkungsgrad der Zerspanung
D :	Bohrdurchmesser
p_s :	Schnittdruck
n :	Bohrerdrehzahl
s_v :	Vorschub je Umdrehung

Bsp: $D = 10mm$, $p_s = 1500N/mm^2$, $n = 740U/min$, $s_v = 0.16mm$, $\eta = 0.75$

$$P_W = 3.14/(4 \cdot 0.75) \cdot 100 \cdot 1500 \cdot 740 \cdot 0.16Nmm/min = 309.8W$$

- Gebläse

$$P_W = \frac{1}{\eta} \cdot Q \cdot p \tag{5}$$

η : Wirkungsgrad des Ventilators
Q : Förderstrom
p : Gesamtdruck

Bsp: $Q = 6m^3/s$, $\eta = 0.4$, $p = 150N/m^2$

$$P_W = 6 \cdot 1/0.4 \cdot 150Nm/s = 2.25kW$$

2.2 Vorgehen

Nach dem Aufstarten von Opal erscheint das in Abbildung 6 dargestellte Hauptfenster. Es

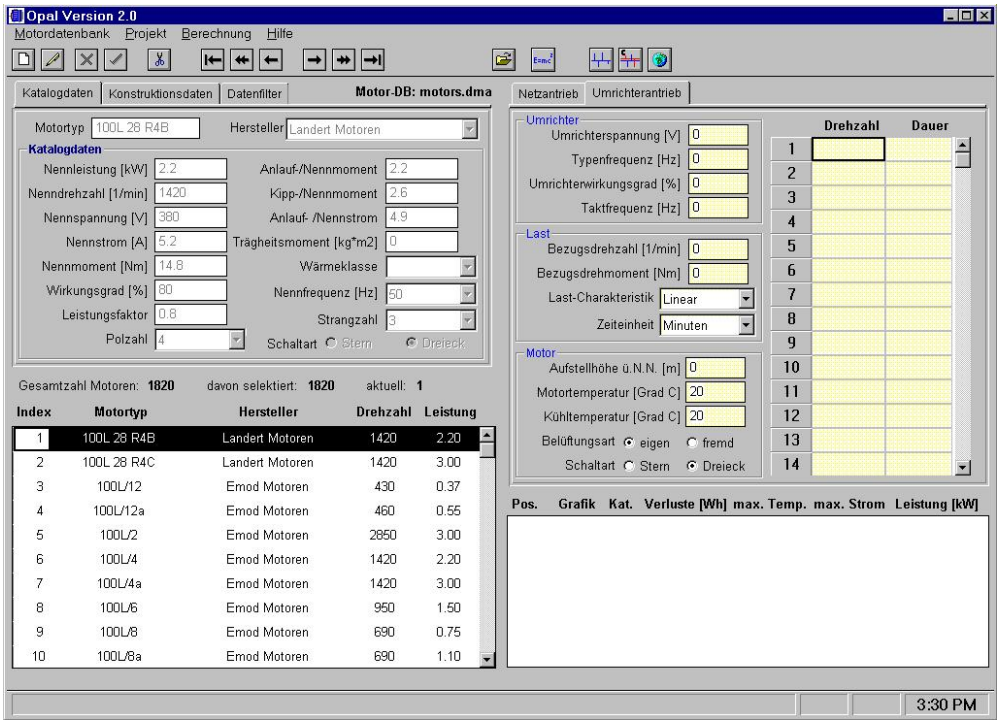


Abbildung 6: Hauptfenster

ist vertikal in zwei Bereiche geteilt. Der linke Bereich enthält die Liste der in der Datenbank enthaltenen Motoren mit den Katalogdaten während im rechten Bereich die Projektdaten und die Liste der berechneten Motoren, die jetzt noch leer ist, dargestellt sind.

Die Auswahl der geeigneten Motoren ist abhängig von

1. der gewählten Motorendatenbank und
2. den vorgegebenen Projektdaten

Die Berechnung wird erst ausgeführt, wenn sowohl die Motorendatenbank geöffnet wie auch die Projektdaten eingegeben sind.

Nach erfolgter Berechnung können Sie, sooft Sie wollen, die Projektdaten ändern und erneut eine Berechnung durchführen.

2.3 Öffnen der Motorendatenbank

In der Motorendatenbank abgelegt sind die Katalogdaten von Motoren der wichtigsten Hersteller mit den eventuell von SEMAFOR, von Ihnen oder von Dritten stammenden Ergänzungen.

Beim Aufstarten von Opal wird automatisch die Standard-Datenbank geöffnet. Wollen Sie die Datenbank wechseln, dann gehen Sie wie folgt vor:

1. Aktivieren Sie das Menu **"Motordatenbank"** ⟶ **"Oeffnen"**. Es erscheint das Dialogfenster zur Auswahl der Motorendatenbank.
2. Wählen und öffnen Sie die der Datenbank entsprechende Datei (zum Beispiel `motors.dma`).

Sie erhalten in der Liste alle Motoren angezeigt. Das linke obere Feld enthält die Katalogdaten des selektierten Motors in dieser Liste. Die weiteren Daten zu diesem Motor können Sie sich anzeigen lassen, wenn Sie mit dem Mauszeiger auf den Griff **"Konstruktionsdaten"** klicken.

Mit den Menubefehlen **"Motordatenbank"** ⟶ **"Neue Datenbank"** und **"Motordatenbank"** ⟶ **"Speichern unter"** können Sie eine neue Datenbank generieren respektive die aktuelle unter einem andern Namen abspeichern.

Wenn Sie die Berechnung nur mit bestimmten Motoren durchführen wollen, können Sie nun die Vorauswahl einschränken, indem Sie auf den Griff **"Datenfilter"** klicken (Abbildung 7). Hier können Sie die Begrenzungsbedingungen eingeben. Zum Beispiel können Sie aus

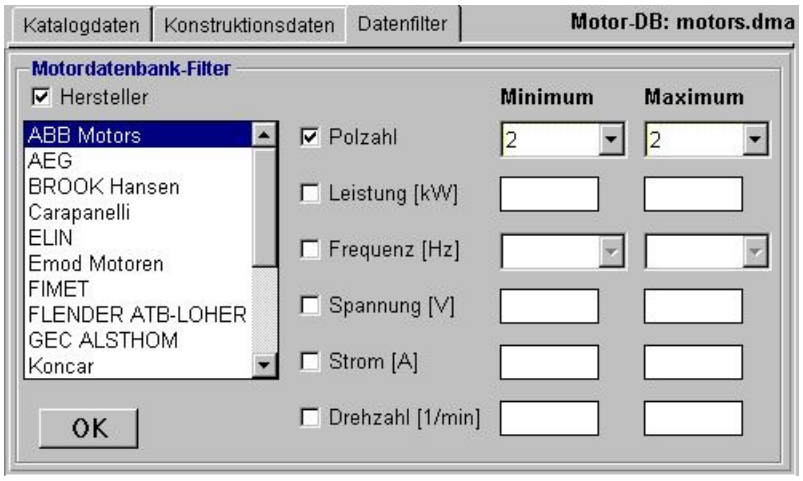


Abbildung 7: Vorauswahl von Motoren

der Liste der Hersteller diejenigen auswählen, mit denen die Auswahl durchgeführt werden soll. Dazu aktivieren Sie das Feld **“Hersteller”**.

Interessieren Sie sich nur für Motoren mit 400V Nennspannung, dann aktivieren Sie das Feld **“Spannung [V]”** und geben “`400`” für den Minimal- und Maximalwert in den Eingabefeldern der Spannung ein. Mit der Eingabe von “`100`” für den Minimalwert der Nennleistung selektieren Sie Motoren mit mehr als 100 kW Nennleistung. Ein Klicken auf die Schaltfläche **“OK”** generiert die gewünschte Vorauswahlliste.

Durch Klicken auf eine Zeile dieser Liste werden die zugehörigen Katalogdaten angezeigt.

Wenn Sie die aktivierten Felder deaktivieren und anschliessend die Schaltfläche **“OK”** anklicken, werden wieder alle in der Datenbank enthaltenen Motoren für die Vorauswahl berücksichtigt.

2.4 Eingabe der Projektdaten

Vor der Eingabe der Projektdaten müssen Sie entscheiden, ob der Motor direkt am Netz betrieben wird, oder ob ein Frequenzumrichter verwendet werden soll. Diese Auswahl treffen Sie durch die Selektion eines der beiden Felder **“Netzantrieb”** oder **“Umrichterantrieb”**.

Nach dem Klicken auf die Schaltfläche **“Projekt öffnen”** erscheint das Dialogfenster zur Auswahl der Projektdatei. Geben Sie einen neuen Namen ein, wenn Sie ein neues Projekt definieren wollen, oder wählen Sie ein schon erstelltes in der Liste aus und öffnen die Datei. Die Art des Antriebes wird durch die Endung des Dateinamens unterschieden: Endungen mit `.dla` bezeichnen Netzantriebe, Endungen mit `.dlb` bezeichnen Umrichterantriebe.

Die Projektdaten umfassen

- die Charakteristik der Last (Arbeitsmaschine): Trägheitsmoment, Lastkennlinie, Nenndrehzahl und -moment.
- die Umgebungsbedingungen: Netzspannung, -frequenz, Temperatur, Aufstellhöhe etc.
- die Betriebsart: Drehmoment/Zeit-Verlauf (resp. Drehzahl/Zeit): das sogenannte „Lastspiel“.

2.4.1 Netzantriebe

Bei Netzantrieben werden die folgenden IEC-Normbetriebsarten (Tabelle 2) von OPAL unterstützt:

S1 Dauerbetrieb Ein Betrieb mit konstanter Belastung, dessen Dauer ausreicht, den thermischen Beharrungszustand zu erreichen.

S2 Kurzzeitbetrieb Ein Betrieb mit konstanter Belastung, dessen Dauer nicht ausreicht, den thermischen Beharrungszustand zu erreichen, und nachfolgender Pause von solcher Dauer, dass die wieder abgesunkenen Maschinentemperaturen nur noch weniger als 2K von der Temperatur des Kühlmittels abweichen.

S3 Aussetzbetrieb Ein Betrieb, der sich aus einer Folge gleichartiger Spiele zusammensetzt, von denen jedes eine Zeit mit konstanter Belastung und eine Pause umfasst, wobei der Anlaufvorgang die Erwärmung nicht wesentlich beeinflusst.

S4 Aussetzbetrieb mit Anlaufvorgang Ein Betrieb, der sich aus einer Folge gleichartiger Spiele zusammensetzt, von denen jedes eine merkliche Anlaufzeit, eine Zeit mit konstanter Belastung und eine Pause umfasst.

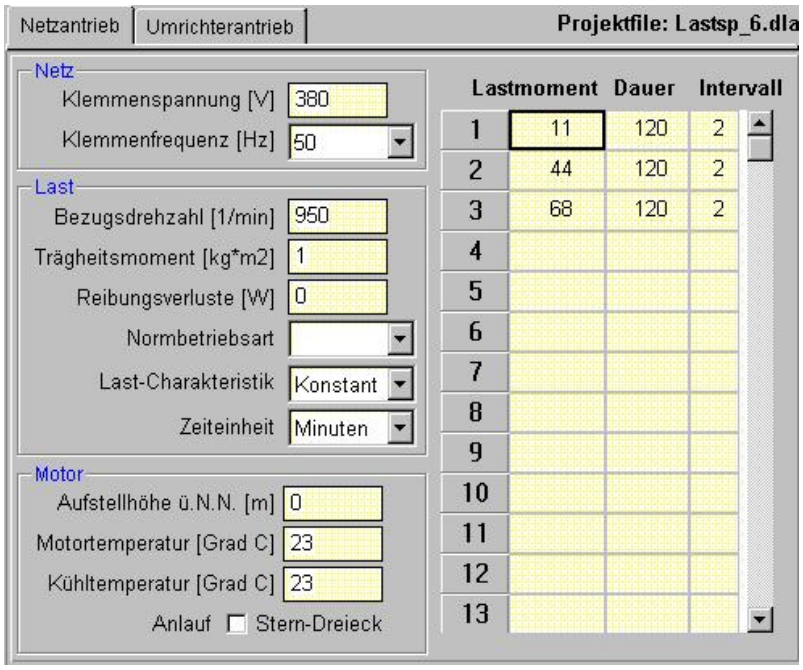


Abbildung 8: Projektdateneingabe für Netzantrieb

Angabe	S1	S2	S3	S4	S6
Lastmoment	x	x	x	x	x
Betriebszeit	x				
Spieldauer		x	x		x
relative Einschaltdauer		x	x	x	x
Schaltungen/Stunde				x	
Wiederholungen			x	x	x
Intervallparameter	2	2,3	2,3	0,3	2,2

Tabelle 2: Von OPAL unterstützte Normbetriebsarten (gemäss IEC 34-1)

S6 Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Aussetzbelastung Ein Betrieb, der sich aus einer Folge gleichartiger Spiele zusammensetzt, von denen jedes eine Zeit mit konstanter Belastung und eine Leerlaufzeit umfasst. Es tritt keine Pause auf.

Mit dem Intervallparameter wird festgelegt, ob

- der Anlauf (resp. Auslauf) mitberechnet werden soll,
- die Spannung während des Intervalls ein- oder ausgeschaltet ist.

Die möglichen Kombinationen zeigt folgende Tabelle:

Intervall-Parameter	Spannung ein	Spannung aus	Anlauf/Auslauf mit	Anlauf/Auslauf ohne
0	x		x	
1		x	x	
2	x			x
3		x		x

Nach der Auswahl der Betriebsart im entsprechenden Feld von Abbildung 8 können die mit x bezeichneten Parameter aus Tabelle 2 in einem Dialogfenster eingegeben werden. OPAL generiert daraus dann das Lastspiel. Die restlichen Projektparameter müssen von Hand ergänzt werden.

Sie können aber auch frei definierte Lastspiele eingeben. Geben Sie dazu fortlaufend die Werte des Lastmoments, der Intervalldauer und des Intervallparameters in die Eingabefelder der Tabelle ein (Rechte Hälfte der Bildschirmmaske Abbildung 8). Um eine Zeile einzufügen, selektieren Sie die Zeile mit der linken Maustaste und drücken die Tasten **"Ctrl-I"**. Analog können Sie mit den Tasten **"Ctrl-D"** auch bereits eingegebene Zeilen löschen. Es wird pro Aktion nur eine Zeile gelöscht. Sie können auch einen Bereich selektieren, diesen kopieren (mit **"Ctrl-C"**) und an einer anderen Stelle wieder einfügen (mit **"Ctrl-V"**). Zusammenfassend dargestellt sind die Editierbefehle in der folgenden Tabelle:

Ctrl-D	Zeile löschen
Ctrl-I	Zeile einfügen
Ctrl-X	auschneiden
Ctrl-C	kopieren
Ctrl-V	einfügen

Die grafische Darstellung des eingegebenen Lastspiels erhalten Sie durch Klicken auf die Schaltfläche **"Projektgrafik"**.

Beispiel 1: Gesucht wird der Antrieb für eine Kreiselpumpe mit $M \sim n^2$ und einer Leistung von 20 kW bei 1450 1/min. Betriebsart S3 mit Spieldauer 10 min, relativer Einschaltdauer 50% und Anzahl Wiederholungen 2. Berechnung des Moments:

$$M = \frac{P}{2\pi \cdot n} = 60 \cdot \frac{20'000}{6.32 \cdot 1450} = 131Nm \tag{6}$$

Resultierendes Lastspiel:

Nr	Moment	Dauer	Intervallparameter
1	131	5	2
2	0	5	3
3	131	5	2
4	0	5	3

Beispiel 2: Gesucht wird der Antrieb einer Kreissäge mit 10kW Leistung bei 6000 1/min, Trägheitsmoment der Säge 0.16 kgm^2, relative Einschaltdauer 25%, Spieldauer 2 min, Betriebsart S6, Wiederholungen 2. Berechnung des Moments bei 3000 1/min:

$$M = \frac{P}{2\pi \cdot n} = 60 \cdot \frac{10'000}{6.32 \cdot 3000} = 31.65Nm \tag{7}$$

Berechnung des Lastträgheitsmoments bei 3000 1/min:

$$J = J' \left(n/n_{mot}\right)^2 = 0.16 \cdot (6000/3000)^2 = 0.64kgm^2 \tag{8}$$

Resultierendes Lastspiel:

Nr	Moment	Dauer	Intervallparameter
1	32	0.5	0
2	0	1.5	1
3	32	0.5	0
4	0	1.5	1

2.4.2 Umrichterantriebe

Bei Umrichterantrieben werden Frequenz und Spannung der Statorwicklung von einer vorgeschalteten Speiseeinheit, dem Frequenzumrichter, jeweils so angepasst, dass sich bei gegebenem Lastmoment die geforderte Drehzahl einstellt. Dabei wird die Spannung bis zu einem Maximalwert der Frequenz proportional nachgeführt, sodass der Wicklungsfluss im Motor konstant bleibt. Man nennt diesen Bereich auch Anlaufbereich .

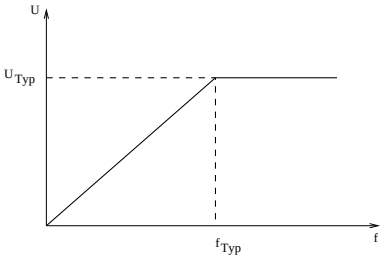


Abbildung 9: Umrichtercharakteristik

Die Frequenz, bei welcher die Spannung ihren Maximalwert erreicht, heisst Typenfrequenz . Steigt die Frequenz über die Typenfrequenz, wird die Spannung konstant gehalten, der Fluss nimmt demzufolge proportional ab. Dieser Bereich wird deshalb Feldschwächbereich genannt. Bei den meisten Umrichtern kann diese in Abbildung 9 dargestellte Charakteristik in bestimmten Grenzen eingestellt werden.

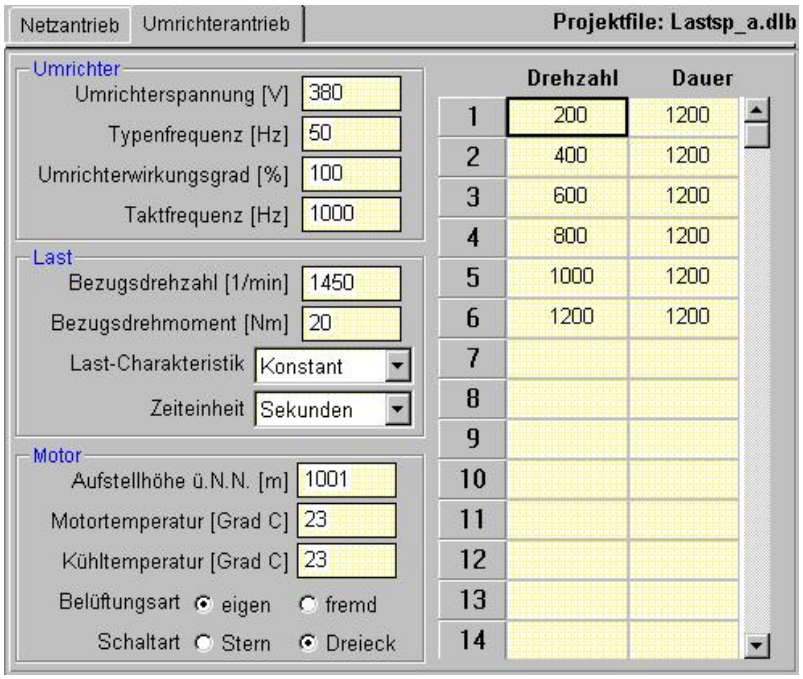


Abbildung 10: Projektdateneingabe bei Umrichterantrieb

Alle relevanten Projektdaten zu Umrichter, Last und Motorumfeld, sowie das Lastspiel werden in der Eigabemaske (Abbildung 10) eingegeben.

Das von der Last geforderte Drehmoment wird aus

- dem von Drehzahl n_i und Dauer t_i gebildeten Lastspiel,
- dem bei der Bezugsdrehzahl n_o entstehenden Bezugsmoment M_o,
- sowie der Lastcharakteristik (konstant, linear, exponentiell)

für jedes Lastspielintervall nach der folgenden Vorschrift berechnet:

$$M_i(n) = \begin{cases} M_o & \text{konstant} \\ M_o \cdot n_i/n_o & \text{linear} \\ M_o \left(n_i/n_o\right)^2 & \text{exponentiell} \end{cases} \tag{9}$$

2.5 Berechnungen durchführen

Mit dem Klicken auf den Menuschalter **“Berechnung”** $\longrightarrow$ **“Starten”** (oder die Schaltfläche **“Berechnen”** oder **“Ctrl-A”**) wird die Berechnung gestartet (vorausgesetzt, die Projektdaten sind eingegeben). Zunächst erscheint das Berechnungsdialogfenster (Abbildung 11) mit einem Vorschlag zur Vorauswahl der Motoren. Sie können diese nach Belieben erweitern oder einschränken. Anschliessend aktivieren Sie die Schaltfläche **“Start”**. Während der Ausführung der Simulation wird laufend angezeigt, wieviele Motoren bereits berechnet sind und mit welchem Motor die Berechnung gerade durchgeführt wird.

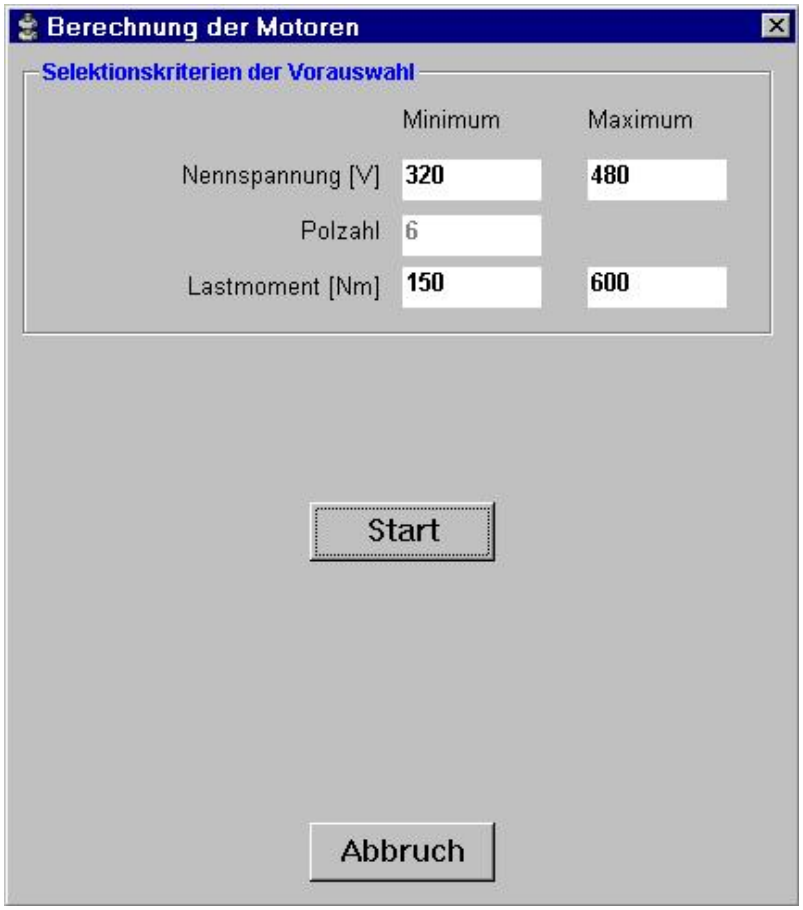


Abbildung 11: Berechnungsdialogfenster

Wichtig: Überprüfen Sie bitte immer die folgenden Punkte:

1. Die maximale Temperatur darf 125^oC bei Wicklungen der Wärmeklasse B nicht überschreiten. Bei der Wärmeklasse F beträgt die zulässige Temperatur 155^oC und bei H 180^oC.
2. Ist die Dauer des Lastspiels lang genug, dass der thermische Beharrungszustand erreicht wird? Werden die eingegebenen Umgebungstemperaturen nie überschritten?
3. Bei Aufstellhöhen von mehr als 1000 m.ü.M. müssen infolge geringeren Luftdruckes u.U. Motoren mit grösserer Nennleistung gewählt werden.
4. Überprüfen Sie bei Netzbetrieb stets die Anlaufzeit und die Trägheitsmomente von Motor und Last. Erreicht der Motor die verlangte Drehzahl? Die Anlaufzeit wird unter der Annahme berechnet, dass die Netzspannung konstant bleibt. Sie wird unter realen Bedingungen also grösser sein.
5. Liegt der Anlaufstrom (Maximalstrom) innerhalb zulässiger Werte?
6. Wählen Sie bei Netzbetrieb einen Motor mit 400V Nennspannung, wenn die Netzspannung ebenfalls 400V beträgt.
7. Bevorzugen Sie wenn möglich Motoren der Kategorien A-E, da ihre Ergebnisse (v.a. die Verluste) genauer sind als bei Motoren, bei denen nur die Katalogdaten bekannt sind.
8. Lassen Sie sich die Eignung des gewählten Motors mit Angabe der Projektdaten vom Hersteller oder Lieferanten bestätigen.

2.6 Grafische Analyse

Nach erfolgter Berechnung können die Ergebnisse verschiedener Motoren grafisch analysiert und verglichen werden. Gehen Sie dabei wie folgt vor:

1. Wählen Sie zuerst jene Motoren aus, von denen Sie die grafischen Verläufe angezeigt haben wollen, indem Sie in der Ergebnisliste die Grafikspalte der entsprechenden Zeilen anklicken.
2. Klicken Sie auf die Schaltfläche **"Resultatgrafik"** (oder **"Ctrl-G"**). Sie erhalten nun das Grafikfenster mit den Verläufen der Statorströme, der Drehzahlen, der Temperaturen und der Drehmomente der ausgewählten Motoren angezeigt (Abbildung 12).

Die Kennlinien der Motoren unterscheiden sich durch ihre Farbe. Mit der rechten Maustaste können Sie wahlweise eines der 4 Diagramme vergrössern. Ein erneutes Betätigen der rechten Maustaste zeigt die 4 Diagramme wieder in der Ausgangslage.

2.7 Berechnen der Wirtschaftlichkeit

Selektieren Sie einen Motor in der Liste der berechneten Motoren und klicken Sie auf die Schaltfläche **"Wirtschaftlichkeitsdialog"** (oder **"Ctrl-E"**). Es erscheint ein Dialogfenster (Abbildung 13) mit der mittleren Leistung des gewählten Motors. Sobald sie alle Wirtschaftlichkeitsparameter eingegeben haben, werden die Jahreskosten berechnet und angezeigt.

Beispiel eines 11 kW Motors:

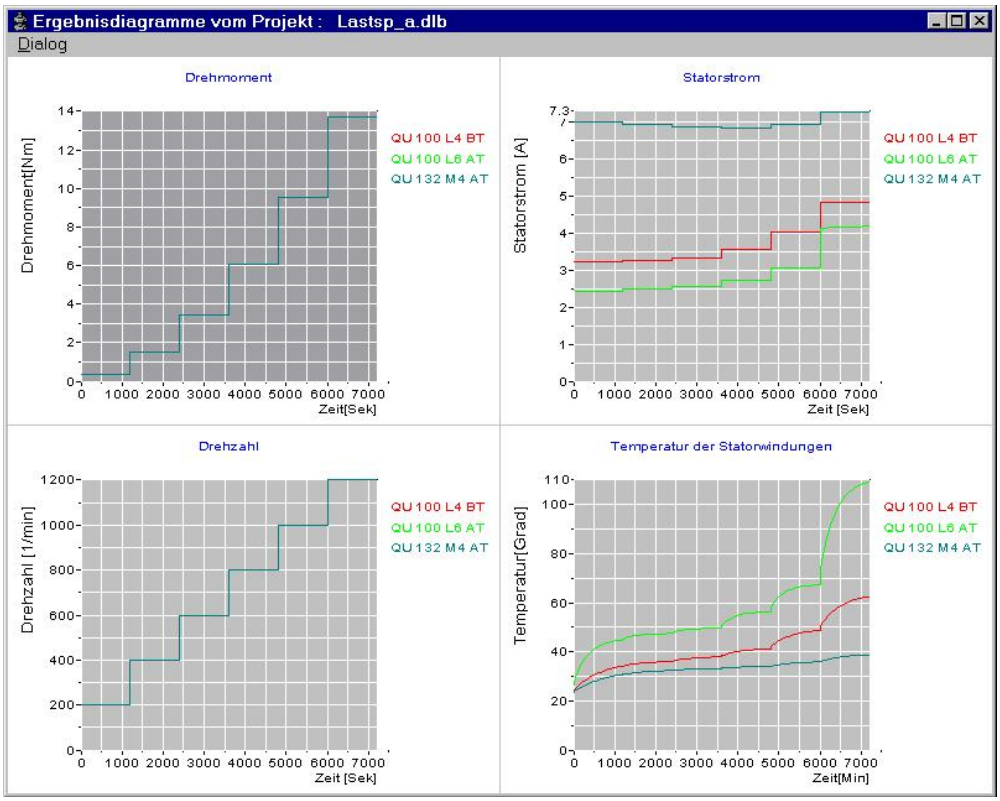


Abbildung 12: Diagrammfenster

mittlere elektrische Leistung ($\eta = 0.89$)	12.19 kW
jährliche Betriebsdauer	5000 h
Energiepreis	0.2 CHF/kWh
Nutzungsdauer	6 Jahre
Teuerungsrate	3 %
Kalkulationszinssatz	7 %
Investition	1’200.–
Wartung und Unterhalt	100.–

Die jährlichen Kosten betragen: 13’768.–, dazu tragen allein die Energiekosten 12’000.– bei. Der Motor verursacht demnach Kosten, die jährlich mehr als das Zehnfache seines Kaufpreises betragen.

Eine Verbesserung des Wirkungsgrades um 1% würde in diesem Beispiel eine Investition von 1’935.– (+53%) wirtschaftlich rechtfertigen oder bei gleicher Investitionssumme die Jahreskosten um 154.– reduzieren.

2.8 Erstellen des Berechnungsprotokolls

Wählen Sie aus der Liste der berechneten Motoren den Sie interessierenden Motor aus, indem Sie die entsprechende Zeile mit Drücken der linken Maustaste markieren. Klicken Sie anschliessend auf den Menupunkt **“Berechnung”** $\longrightarrow$ **“Ergebnis”** $\longrightarrow$ **“Druckervorschau”** (oder **“Ctrl-P”**). Das Berechnungsprotokoll wird nun aufbereitet und am Bildschirm angezeigt (Abbildung 14). Dabei wird ein neuer Menupunkt **“Druckvorschau”** erzeugt, mit welchem alle hier möglichen Aktionen zugänglich gemacht werden. Sie sind ebenfalls auf der Toolbar verfügbar.

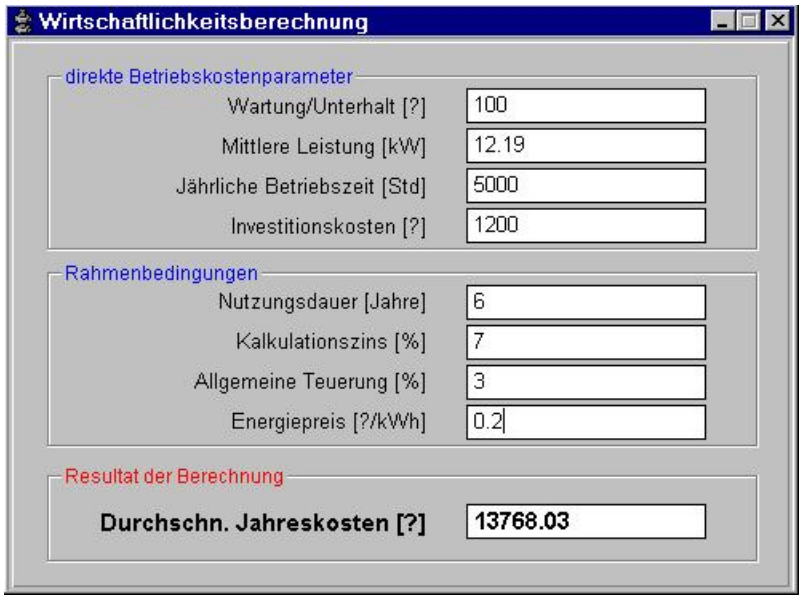


Abbildung 13: Berechnung der Wirtschaftlichkeit

Mit den Schaltflächen **“Nächste Seite”** und **“Vorherige Seite”** können Sie im Dokument blättern und mit **“Drucken”** oder **“Drucken aktueller Seite”** das ganze Dokument ausdrucken respektive die gerade angezeigte Seite.

Mit **“Zwischenablage”** wird das Dokument auf das Clipboard kopiert.

“Nächster Motor” und **“Vorheriger Motor”** erlauben das Navigieren durch die Liste der berechneten Motoren.

Verlassen Sie die Druckvorschau mit **“Schliessen”** oder der Taste **“Esc”**.

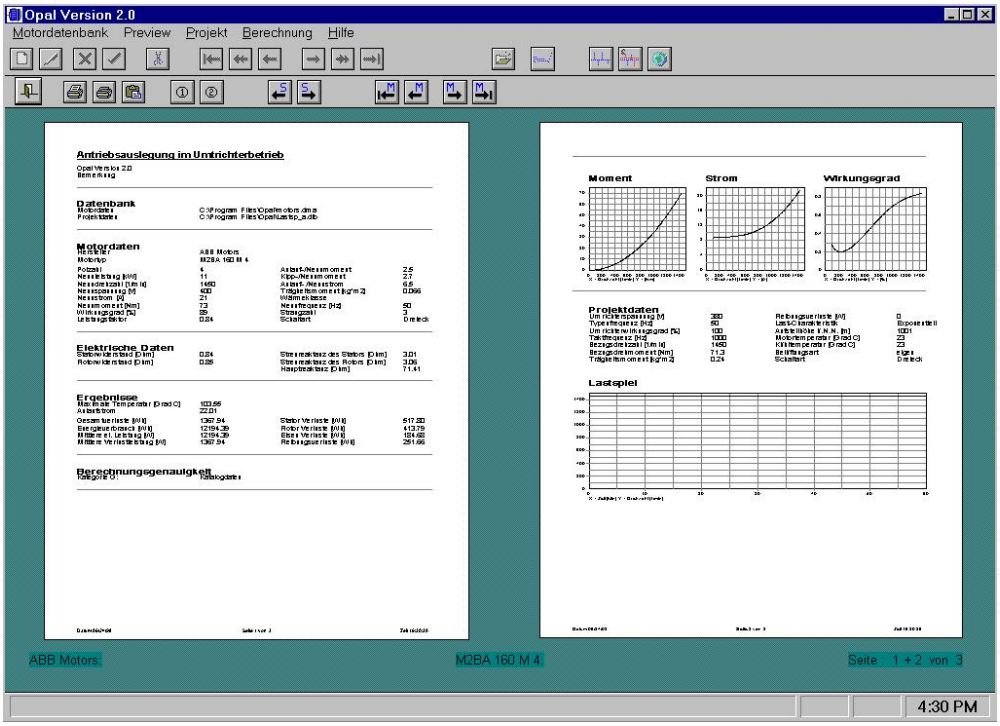


Abbildung 14: Berechnungsprotokoll

3 Datenverwaltung

Unter der Datenverwaltung versteht man im allgemeinen das Erfassen, Suchen, Anzeigen und Ändern von Daten.

Die Motordaten sind in einer Datenbank bestehend aus 4 Dateien, die sich im Arbeitsverzeichnis von OPAL befinden (siehe auch Kap. A.1) enthalten. Legen Sie eine Sicherungskopie dieser Dateien an, bevor Sie Änderungen am Datenbestand durchführen.

Im folgenden ist vorausgesetzt, dass die Motorendatenbank geöffnet ist.

3.1 Firmendaten erfassen und ändern

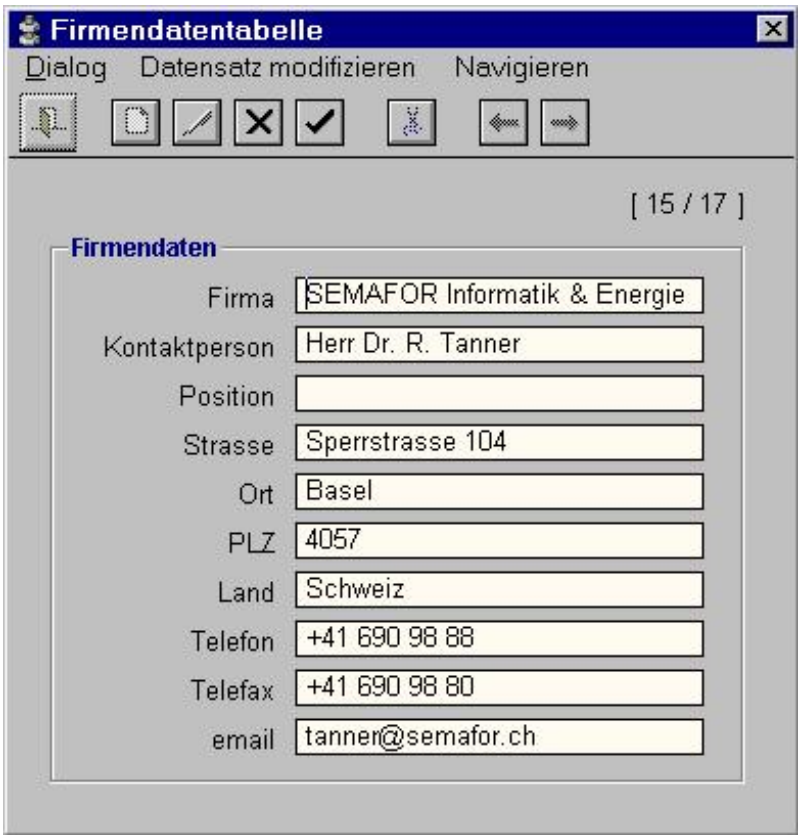


Abbildung 15: Firmendatendialog

Aktivieren Sie das Menu **“Motordatenbank”** ⟶ **“Firmendatenbank”**. Es erscheint das Dialogfenster mit den Firmendaten (Abb. 15). Suchen Sie mittels den Schaltflächen **“Vorwärts”** und **“Rückwärts”** den zu bearbeitenden Datensatz. Mit **“Ändern”** starten Sie den Editiermodus. Wenn Sie eine neue Firma eintragen wollen, klicken Sie auf die Schaltfläche **“Neu”**. Speichern Sie die Daten nach erfolgter Eingabe ab, indem Sie auf die Schaltfläche **“Speichern”** klicken. Mit dem Menuknopf **“Rückgängig”** können Sie die Änderungen aber auch wieder rückgängig machen. **“Löschen”** können Sie einen Datensatz nur, falls keine Motoren dieses Herstellers in der Datenbank vorhanden sind. Nach Abschluss der Eingaben, müssen Sie das Dialogfenster schliessen.

3.2 Motoren erfassen

Klicken Sie im Hauptfenster auf die Schaltfläche **“Neu”**. Es erscheint ein Dialogfenster mit der Frage, ob Sie die Daten des aktuellen Motors kopieren, oder ob Sie sie vollständig neu eingeben wollen. Drücken Sie auf die entsprechende Schaltfäche und geben Sie die Werte des neuen Motors ein.

Bevor Sie den neu erfassten Motor abspeichern, sollten Sie darauf achten, dass

- bis auf die Wärmeklasse alle Daten der Eingabemaske Katalogdaten vorhanden sind
- ein Motor mit identischen Eingaben für Hersteller, Motortyp, Nennleistung und Nenndrehzahl nicht akzeptiert wird.

Speichern Sie den Motor ab, indem Sie auf die Schaltfläche **“Speichern”** klicken. Mit der Schaltfläche **“Rückgängig”** wird der Vorgang abgebrochen.

3.3 Motoren suchen

Aktivieren Sie den Griff **“Datenfilter”** und geben Sie Ihre Suchkriterien ein. Beispiele für Suchkriterien:

Parameter	Min	Max	Auswahl
Polzahl	2	2	alle zweipoligen Motoren
Leistung	8	10	alle Motoren zwischen 8 und 10 kW
Leistung	8		alle Motoren mit mehr als 8 kW
Leistung		10	alle Motoren mit weniger als 10kW

Drücken Sie auf die Schaltfläche **“OK”**. Die Liste mit den selektierten Motoren wird angezeigt. Wählen Sie einen Motor mit einem Mausklick auf die entsprechende Zeile aus. Die Daten des selektierten Motors werden angezeigt.

3.4 Motordaten ändern und löschen

Suchen Sie den Datensatz des zu ändernden Motors und aktivieren sie die Schaltfläche **“Ändern”**. Geben Sie nun die Werte ein.

Sie speichern den Motor ab, indem Sie auf die Schaltfläche **“Speichern”** klicken oder stellen den alten Zustand mit **“Rückgängig”** wieder her. Die Schaltfläche **“Löschen”** entfernt den aktuellen Datensatz aus der Datenbank.

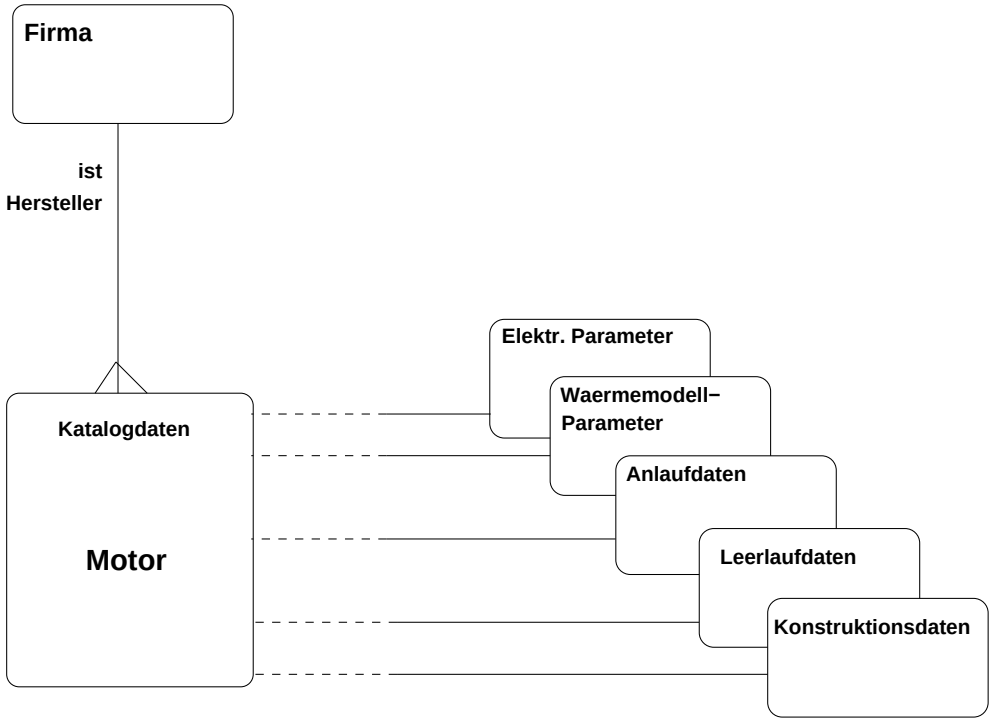


Abbildung 16: Motordatenmodell

A Datenmodell

A.1 Motor

Das in Abbildung 16 dargestellte und in OPAL implementierte Datenmodell lässt sich wie folgt beschreiben:

Jeder Motor hat genau einen Hersteller. Er ist mindestens durch seine Katalogdaten beschrieben, kann aber zusätzlich mit den elektrischen Parametern, den Wärmemodellparametern, den Anlaufdaten, den Leerlaufdaten und den Konstruktionsdaten spezifiziert sein. Er ist eindeutig durch seinen Motortyp und Hersteller gekennzeichnet.

Implementiert ist dieses Modell durch folgende Dateien (basierend auf B+Tree/ISAM von Nildram Software UK), die sich im Arbeitsverzeichnis von OPAL befinden:

`motors.dma`	enthält die Motortabelle
`motors.xma`	enthält die Indices der Motortabelle
`motors.dmb`	enthält die Lieferantentabelle
`motors.xmb`	enthält die Indices der Lieferantentabelle

A.1.1 Katalogdaten

herId	Motorhersteller
motLieId	Motorlieferant
datLieId	Datenlieferant
typ	Motortyp
pz	Polzahl
f1nenn	Nennfrequenz [Hz]
pnenn	Nennleistung [kW]
dnenn	Nenndrehzahl [1/min]
u1nenn	Nennspannung [V]
i1nenn	Nennstrom [A]
mnenn	Nennmoment
eta	Wirkungsgrad bei Volllast [%]
cos_phi	Leistungsfaktor (bei Volllast)
kanlm	Anlaufmoment/Nennmoment
kkippm	Kippmoment/Nennmoment
kanls	Anlaufstrom/Nennstrom
jrot	Rotorträgheitsmoment [kgm^2]
wakl	Wärmeklasse
schalt	Schaltart (Stern od. Dreieck)
m	Strangzahl

A.1.2 Konstruktionsdaten

bauf	Bauform
nbauf	Nebenbauform
sich	Sicherheit
kuel	Kühlart
baugr	Baugrösse
gew	Gewicht
bestell	Bestellnummer
preis	Preis
bem	Bemerkungen zum Motor

A.1.3 Leerlaufdaten

r1_0	Statorwiderstand [Ω] bei 20^oC
i1_0	Leerlaufstrom [A]
pfe	Eisenverluste [kW]
pfric	Reibungsverluste [kW]

A.1.4 Anlaufdaten

tanlkalt	maximale Anlaufzeit kalt [s]
tanlwarm	maximale Anlaufzeit warm [s]
tanljmax	maximale Anlaufzeit [s] mit jmax
zulanlkalt	Anzahl zulässige Anläufe kalt
zulanlwarm	Anzahl zulässige Anläufe warm
jmax	maximales Trägheitsmoment [kgm^2]

A.1.5 Wärmemodelldaten

c1	Wärmekapazität [Ws/K] der Statorwicklung
c2	Wärmekapazität des Rotors
c3	Wärmekapazität des Statorjochs
a10	Wärmeleitwert [W/K] zw. Statorwicklung und Umgebung
a12	Wärmeleitwert zw. Statorwicklung und Rotor
a13	Wärmeleitwert zw. Statorwicklung und Statorjoch
a20	Wärmeleitwert zw. Statorjoch und Umgebung
a23	Wärmeleitwert zw. Statorjoch und Rotor
a30	Wärmeleitwert zw. Rotor und Umgebung

A.1.6 Elektrische Parameter

r1	Statorwiderstand [Ω]
r2	Rotorwiderstand [Ω]
x1s	Streureaktanz des Stators [Ω]
x2s	Streureaktanz des Rotors [Ω]
xh	Hauptreaktanz [Ω]
k2u	Faktor für Pulsationsverluste [5]

A.1.7 Firmendaten

firma	Motorhersteller
kper	Kontaktperson
pos	Position der Kontaktperson
str	Strasse
nr	Strassennummer
ort	Ort
plz	Postleitzahl
land	Land
tel	Telefonnummer
fax	Faxnummer

A.2 Projektdaten bei Netzantrieb

f1	Netzfrequenz
u1	Netzspannung
j	Trägheitsmoment
nnenn	Nenndrehzahl
charData	Lastcharakteristik (konstant, linear, exponentiell)
frik	Lastreibungsmoment
stardelta	Stern-Dreieck-Anlauf
tcool	Kühlmittel- od. Umgebungstemperatur
mtemp	Motoranfangstemperatur
hasl	Aufstellhöhe über Meer
timeData	Zeiteinheit (Sekunden/Minuten)
ml	Lastmoment
tint	Intervalldauer
interv	Intervallparameter (0,1,2,3)
mmax	maximales Lastmoment

Das Lastmoment ml, die Intervalldauer tint sowie der Intervallparameter interv sind Listen beliebiger Länge.

A.3 Projektdaten bei Umrichterantrieb

ft	Typenfrequenz
uc	Maximalspannung
etac	Umrichterwirkungsgrad
ftakt	Taktfrequenz
j	Trägheitsmoment
nbez	Bezugsdrehzahl
mbez	Bezugsmoment
charData	Lastcharakteristik (konstant, linear, exponentiell)
pfric	Lastreibungsverluste
stardelta	Stern- oder Dreieck-Schaltung
tcool	Kühlmittel- od. Umgebungstemperatur
mtemp	Motoranfangstemperatur
hasl	Aufstellhöhe über Meer
timeData	Zeiteinheit (Sekunden/Minuten)
nl	Drehzahl
tint	Intervalldauer

Die Drehzahl nl und die Intervalldauer tint sind Listen beliebiger Länge.

A.4 Berechnungsergebnisse

consumption	Energieverbrauch
tStart	Anlaufzeit
meanPower	mittlere Leistung
meanLosses	mittlere Verlustleistung
frictionLosses	Reibungsverluste
statorLosses	Kupferverluste (Stator)
rotorLosses	Kupferverluste (Rotor)
ironLosses	Eisenverluste
maxStatorTemperature	Maximale Statorwicklungstemperatur
startingCurrent	Anlauf- oder Maximalstrom

B Berechnungsablauf

B.1 Vorauswahl bei Netzantrieb

Zur Vorauswahl bei Netzantrieb wird die Datenbank nach Motoren durchsucht, auf die die folgenden Kriterien zutreffen:

- Polzahl $\sim 2 \cdot 60$ Frequenz/Drehzahl
- 0.8 Netzspannung $<$ Nennspannung $<$ 1.2 Netzspannung
- 1/2 max. Lastmoment $<$ Nennmoment $<$ 2 max. Lastmoment

Die Polzahl wird dabei aus der Nenndrehzahl des Lastspiels bestimmt:

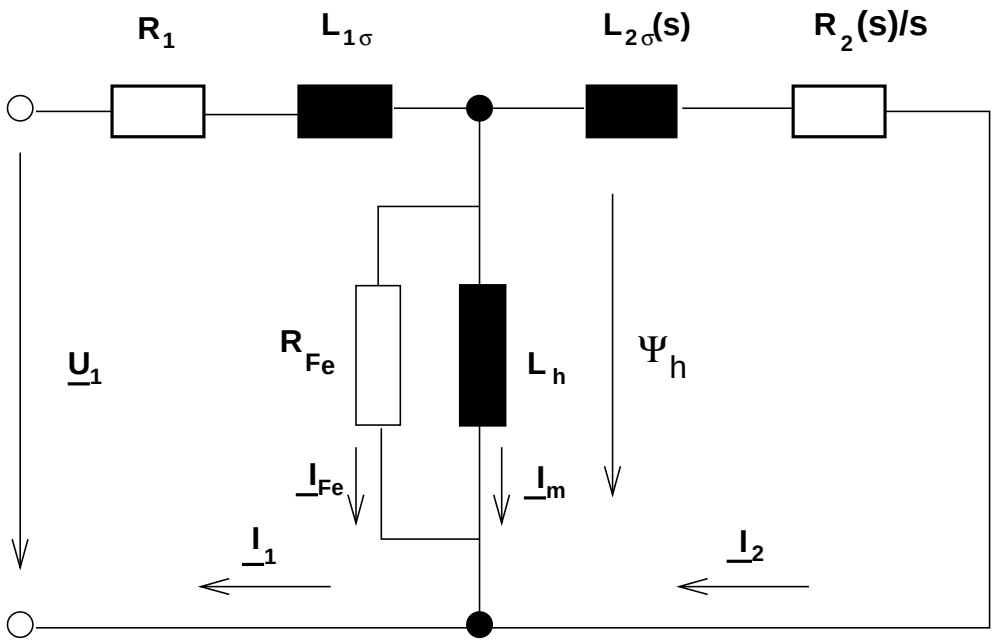


Abbildung 17: T-Ersatzschaltbild

Polzahl	(60· Frequenz)/Nenndrehzahl
2	0 . . . 1
4	1 . . . 2
6	2 . . . 3
8	3 . . . 4
10	4 . . . 5
12	5 . . . ∞

B.2 Vorauswahl bei Umrichterantrieb

Bei Umrichterantrieben werden die Motoren gemäss folgender Vorschrift vorselektiert:

- Nennleistung: $0.8P_{2max} < P_n < 5P_{2max}$
- Polpaarzahl $\geq 2\pi \cdot M_{max} \cdot f_{typ}/P_{2max} - 1$

B.3 Elektrisches Modell

Es werden für die Berechnungen die folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen

- Die Netzspannung ist konstant, symmetrisch und sinusförmig.
- Die Statorimpedanzen sind konstant und symmetrisch und nur der Wicklungswiderstand ist von der Temperatur abhängig.

Die Spannungsgleichungen für das T-Ersatzschaltbild (Abbildung 17) lauten:

$$U_1 = [R_1(\vartheta) + j \cdot X_{1\sigma}]\,\underline{I}_1 + j\omega_1\Psi \quad (10)$$

$$0 = \left[\frac{R_2(\vartheta, s)}{s} + j \cdot X_{2\sigma}(s)\right]\underline{I}_2 + j\omega_1\Psi \quad (11)$$

$$\omega_1\Psi = \frac{R_{Fe}X_h}{R_{Fe} + jX_h}\,(\underline{I}_1 + \underline{I}_2) \quad (12)$$

Das Drehmoment an der Welle berechnet sich aus der Leistungbilanz:

$$M_w(\vartheta, s) = \frac{p}{\omega_1}\,[P_1(\vartheta, s) - P_{cu1}(\vartheta, s) - P_{Fe}(\vartheta, s)] - M_{reib}(s) \quad (13)$$

wobei:

$s = 1 - p\Omega/\omega_1$	Schlupf
$R_1(\vartheta_{cu}, \vartheta_{Fe})$	Statorwiderstand
$R_2(\vartheta, s)$	schlupfabhängiger Rotorwiderstand
$\underline{I}_1$	komplexer Statorstrom
$\underline{I}_2$	komplexer Rotorstrom
X_h	Hauptreaktanz
R_{Fe}	Eisenwiderstand
Ψ	Hauptfluss
$X_{1\sigma} = \omega_1 L_{1\sigma}$	Streureaktanz des Stators
$X_{2\sigma}(s) = \omega_1 L_{2\sigma}(s)$	schlupfabhängige Streureaktanz des Rotors
$\omega_1 = 2\pi f_1$	Kreisfrequenz der Statorspannung
$\Omega = 2\pi n$	Kreisfrequenz der Welle
$p = pz/2$	Polpaarzahl
$P_1(\vartheta, s)$	Elektrische Leistung
$P_{cu1}(\vartheta, s)$	Statorkupferverlustleistung
$P_{Fe}(\vartheta, s)$	Statoreisenverlustleistung
$M_{reib}(s) = M_{reibo}(1 - s)^{1.7}$	Reibungsmoment des Motors (Lager, Ventilation etc.)

Die Schlupfabhängigkeit der Rotorimpedanzen wird durch folgende Beziehungen berücksichtigt:

$$R_{2o}(s) = \frac{R_{2N} - R_{2A}}{s_N - 1}(s - 1) + R_{2A} \quad (14)$$

$$X_{2\sigma}(s) = \frac{X_{2\sigma N} - X_{2\sigma A}}{s_N - 1}(s - 1) + X_{2\sigma A} \quad (15)$$

Mit:

$R_{2A}, X_{2\sigma A}$	Rotorwiderstand und -streuung im Stillstand
$R_{2N}, X_{2\sigma N}$	Rotorwiderstand und -streuung bei Nennschlupf

Die Temperaturabhängigkeit der Widerstände wird durch die Beziehungen:

$$R_1(\vartheta_{cu}, \vartheta_{Fe}) = R_{1o}[1 - \alpha((1.7 \cdot \vartheta_{cu} + 0.52 \cdot \vartheta_{Fe})/2.22 - \vartheta_o)] \quad (16)$$

$$R_2(\vartheta, s) = R_{2o}(s)[1 - \alpha(\vartheta - \vartheta_o)] \quad (17)$$

mit dem Temperaturkoeffizienten $\alpha = 3.9 \cdot 10^{-3}K^{-1}$ berücksichtigt. Die Bezugstemperatur ϑ_o beträgt 20^oC.

Aus den in den Katalogdaten enthaltenen Angaben über das Anlaufmoment und den Anlaufstrom können die Impedanzen im Stillstand durch ein numerisches Näherungsverfahren bestimmt werden.

B.3.1 Berechnung der Ströme bei Umrichterantrieb

Ausgehend von $\omega_1 = 2\pi \cdot p \cdot n_i/60$ und $U_1 = n_i/n_{typ} U_{conv}$ wird die Frequenz ω_1 schrittweise erhöht und damit deren numerische Lösung bei gegebener Drehzahl und Moment bestimmt.

Bei höheren Frequenzen wird die Spannung konstant gehalten, der Fluss nimmt also mit wachsender Frequenz proportional ab. Dieser Betriebsbereich wird Feldschwächbereich genannt. Die Berechnung der Ströme erfolgt in diesem Fall mit eingeprägter Spannung.

Aus dem Frequenzspektrum der Spannung des idealen PWM-Umrichters können die Amplituden der Oberharmonischen der Ströme mit:

$$\underline{I_{1\nu}} = \underline{I_{2\nu}} = \frac{U_{1\nu}}{R_1 + R_{2\nu} + j(X_{1\sigma} + X_{2\sigma\nu})} \tag{18}$$

berechnet werden.

B.3.2 Verlustleistungen

Die Verlustleistungen werden mit Hilfe der Beziehungen:

$$P_{cu1} = mR_1 \sum I_{1\nu}^2 \tag{19}$$

$$P_{cu2} = m \sum I_{2\nu}^2 \cdot R_{2\nu} \tag{20}$$

$$P_{Fe} = mU_h^2/R_{Fe} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{nom}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Psi}{\Psi_{nom}}\right)^2 \tag{21}$$

$$P_{add} = 0.005 \cdot P_{1nom} \cdot \left(\frac{f}{f_{nom}}\right)^2 \cdot \left(\frac{I}{I_{nom}}\right)^2 \tag{22}$$

$$P_{fric} = P_{frico} \cdot \left(\frac{n}{n_{nom}}\right)^2 \tag{23}$$

bestimmt. Wobei

$U_h = \omega_1 \Psi$ innere Spannung

B.4 Bestimmung der Parameter aus den Katalogdaten

Die Parameter des elektrischen T-Ersatzschaltbildes (vgl. Abbildung 17) aus den Katalogdaten werden gemäss [4] bestimmt. Dazu benötigt man nebst den Katalogdaten Leistung, Spannung, Strom, Frequenz, Drehzahl, Leistungsfaktor und Kippmoment noch die Werte der Leerlaufdaten: Leerlaufstrom I_{1o}, Statorwicklungswiderstand R_{1o}, sowie die Reibungs- und Eisenverlustleistungen. Fehlen diese Werte, werden sie durch Schätzungen gemäss Tabelle 3 von OPAL ergänzt.

B.5 Mechanisches Modell

Die Bewegungsgleichung bei starr gekoppelten Massen lautet:

$$M_w(\vartheta, s) - M_L(t, s) = (jrot + j)\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{\omega_1}{p}(jrot + j)\frac{ds}{dt} \tag{24}$$

Statorstrom (in A)	$(1.4/pnenn^{0.067} - 0.8143) \cdot i1nenn$
Statorwiderstand bei Δ-Schaltung in Ω	$s_N \cdot \sqrt{3} \cdot u1nenn/i1nenn$
Leerlaufverlustleistung	$P_{v_o} = pnenn \cdot [1/\eta - 1 - s_N/(1 - s_N)] - P_{cu1}$
Eisenverlustleistung	$P_{Fe_N} = P_{v_o}/2$
Reibungsverlustleistung	$P_{reib_N} = P_{v_o}/2$

Tabelle 3: Schätzung der Leerlaufdaten

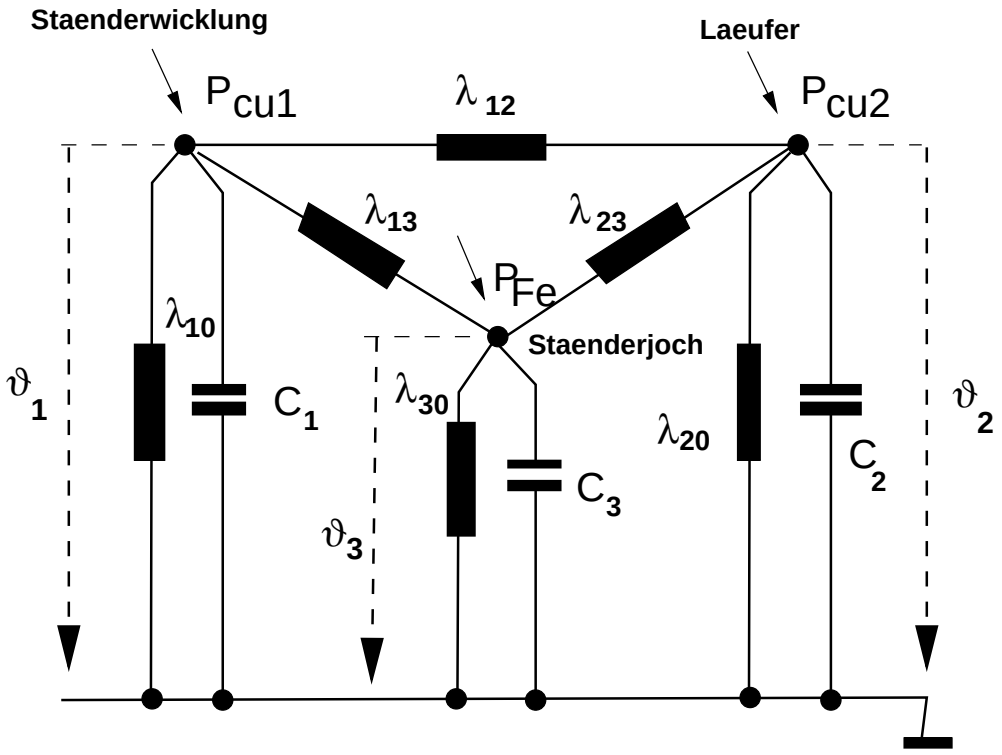


Abbildung 18: Drei-Körper-Wärmemodell

Das Lastmoment ist durch das Lastspielintervall sowie durch die Lastcharakteristik definiert:

$$M_L(t,s) = \begin{cases} ml(t) & \text{konstant} \\ ml(t)\frac{1-s}{1-s_N} & \text{linear} \\ ml(t)\left(\frac{1-s}{1-s_N}\right)^{1.7} & \text{exponentiell} \end{cases} \tag{25}$$

Wenn der Intervallparameter interv=2 beträgt, vereinfacht sich die Bewegungsgleichung zur stationären Gleichung:

$$M_w(\vartheta, s) - M_L(t,s) = 0 \tag{26}$$

B.6 Wärmemodelle

Das in Abbildung 18 dargestellte Wärmequellennetz liefert bei korrekt bestimmten Parametern Temperaturverläufe, die sehr hohen Genauigkeitsanforderungen genügen [5]. Das ent-

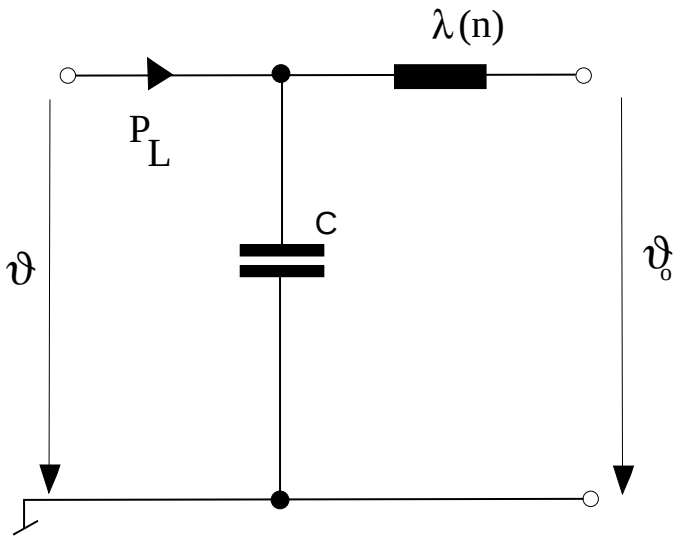


Abbildung 19: Ein-Körper-Wärmemodell

sprechende Differentialgleichungssystem lautet:

$$\begin{pmatrix} \lambda_1^* + C_1\frac{d}{dt} & -\lambda_{12} & -\lambda_{13} & -\lambda_{10} \\ -\lambda_{12} & \lambda_2^* + C_2\frac{d}{dt} & -\lambda_{23} & -\lambda_{20} \\ -\lambda_{13} & -\lambda_{23} & \lambda_3^* + C_3\frac{d}{dt} & -\lambda_{30} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vartheta_U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{cu1} \\ P_{cu2} \\ P_{Fe} \end{pmatrix} \quad (27)$$

Worin:

$$\lambda_1^* = \lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{13} \quad (28)$$
$$\lambda_2^* = \lambda_{20} + \lambda_{12} + \lambda_{23} \quad (29)$$
$$\lambda_3^* = \lambda_{30} + \lambda_{13} + \lambda_{23} \quad (30)$$

Die Wärmeleitwerte λ sind belüftungs- und damit drehzahlabhängig. Man erhält deshalb je einen Wert für die ein- und für die ausgeschaltete Maschine.

Liegen die entsprechenden Temperaturparameter nicht vor, dann wird das in Abbildung 19 gezeigte Ein-Körper-Wärmemodell verwendet, dessen Gleichungssystem sich wie folgt schreiben lässt:

$$\lambda \cdot \vartheta + C \cdot \frac{d\vartheta}{dt} = P_{cu1} + P_{cu2} + P_{Fe} = P_V \quad (31)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet bei konstanten Verlusten P_V:

$$\vartheta(t) = \frac{P_V}{\lambda} \cdot \left(1 - \mathrm{e}^{-\lambda \cdot t/C}\right) \quad (32)$$

Die Temperaturparameter der eingeschalteten Maschine lassen sich so aus der zulässigen Anlaufzeit $tanlkalt$ bestimmen:

$$\lambda_o = \alpha(h)\frac{P_{VN}}{\Delta\vartheta_{max}} \quad (33)$$
$$C = \frac{-tanlkalt \cdot \lambda}{\log(1 - P_{VN}/P_{VA})} \quad (34)$$

Worin:

P_{VN}, P_{VA}	Nenn- und Anlaufverlustleistung
$\Delta\vartheta_{max}$	Grenztemperatur (wärmeklasseabhängig)
$\alpha(h)$	von der Aufstellungshöhe abhängiger Korrekturfaktor

Bei eigenbelüfteten Motoren ist die Wärmeleitfähigkeit drehzahlabhängig. Sie wird bei eigenbelüfteten Motoren:

$$\lambda(n) = \begin{cases} \lambda_o \cdot (2 \cdot n/n_{nenn} + 0.4) & n/n_{nenn} < 0.2 \\ \lambda_o \cdot (0.5 \cdot n/n_{nenn} + 0.7) & 0.6 < n/n_{nenn} < 0.2 \\ \lambda_o & n/n_{nenn} > 0.6 \end{cases} \tag{35}$$

und bei fremdbelüfteten:

$$\lambda(n) = \begin{cases} \lambda_o \cdot (0.35 \cdot n/n_{nenn} + 0.79) & n/n_{nenn} < 0.6 \\ \lambda_o & n/n_{nenn} > 0.6 \end{cases} \tag{36}$$

Wenn die zulässige Anlaufzeit bei Nennspannung nicht gegeben ist, wird ihr Wert mit 12 Sekunden angenommen. Die Aufstellhöhe h wird mit dem Korrekturfaktor α berücksichtigt:

$$\alpha(h) = \begin{cases} 1 & h < 1000 \\ 1 - 0.06 \cdot (h/1000 - 1) & h > 1000 \end{cases} \tag{37}$$

B.7 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgt nach der Annuitätenmethode [6]. Die durchschnittlichen Jahreskosten K einer Investition I mit den jährlichen Betriebskosten A betragen:

$$K = a \cdot (I + d \cdot A) \tag{38}$$

$$a = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \tag{39}$$

$$d = \frac{(1+i_r)^n - 1}{(1+i_r)^n \cdot i_r} \tag{40}$$

$$i_r = i - e_A \tag{41}$$

Worin:

i	Kalkulationszinssatz
e_A	Teuerungsrate
n	Nutzungsdauer (in Jahren)

bedeuten. Die jährlichen Betriebskosten setzen sich aus den Wartungs- und Unterhaltskosten U sowie den Energiekosten $E = t_B \cdot P_m \cdot e_P$ zusammen:

$$A = U + t_B \cdot P_m \cdot e_P \tag{42}$$

mit der jährlichen mittleren Betriebsdauer t_B, der mittleren Leistung P_m und dem Energiepreis e_P.

Oft interessiert die Frage, welche Mehrinvestition bei einer bestimmten Energieeinsparung wirtschaftlich gerechtfertigt ist, das heisst:

$$\Delta K = a \cdot (\Delta I + d \cdot \Delta A) < 0 \tag{43}$$

Man erhält für die zulässige Mehrinvestition bei gleichen Zinssätzen und Unterhaltskosten:

$$\Delta I = -\frac{d \cdot t_B \cdot \Delta P_m \cdot e_P}{a} \tag{44}$$

Literatur

[1] Germar Müller, *Grundlagen elektrischer Maschinen*, VCH (1994)

[2] W. Nürnberg, *Die Prüfung elektrischer Maschinen*, Springer Berlin (1987)

[3] M. Meyer, *Elektrische Antriebstechnik Bd.1: Asynchronmaschinen im Netzbetrieb und drehzahlgeregelte Schleifringläufermaschinen*, Springer Berlin (1985)

[4] Lech Grzesiak, Konrad Reichert, *Equivalent circuit determination of an AC-machine based on catalogue data and values of no-load current and stator resistance*

[5] Reichert, K., Neubauer, R., Reiche, H. & Berg, F., *Elektrische Antriebe energie-optimal auslegen und betreiben*, Eidg. Druck- und Materialzentrale (1993)

[6] Bundesamt für Konjunkturfragen (Hg.), *Strom rationell nutzen - Umfassendes Grundlagenwissen und praktischer Leitfaden zur rationellen Verwendung von Elektrizität.*, Verlag der Fachvereine Zürich (1992)

[7] Neyer, A. & Seidinger, W.,*Grundlagen für Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte bei elektrischen Antrieben*, Schlussbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft (1992)

[8] Jenni,Wüest *Steuerverfahren für selbstgeführte Stromrichter* vdf Hochschulverlag 1995